

(19)



JAPANESE PATENT OFFICE

PATENT ABSTRACTS OF JAPAN

(11) Publication number: 10190090 A ✓

(43) Date of publication of application: 21 . 07 . 98

(51) Int. Cl. H01L 43/00
G01R 33/06
G11B 5/39
G11C 11/15
H01F 10/16

(21) Application number: 09276238

(22) Date of filing: 08 . 10 . 97

(30) Priority: 27 . 11 . 96 US 96 758614

(71) Applicant: INTERNATL BUSINESS MACH
CORP <IBM>(72) Inventor: PARKIN STUART STEPHEN
PAPWORTH

(54) MAGNETIC TUNNEL JUNCTION ELEMENT,
JUNCTION MEMORY CELL, AND JUNCTION
MAGNETIC FIELD SENSOR

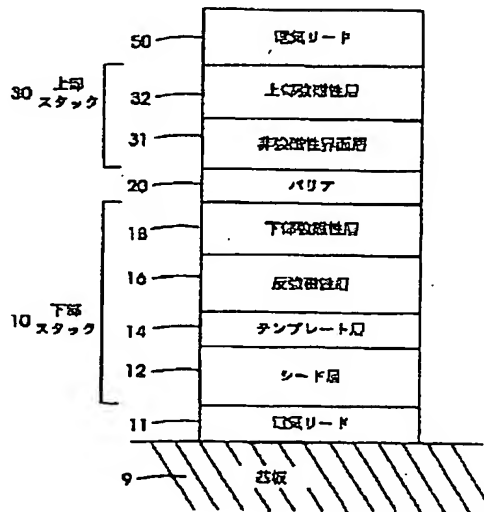
to be pinned by proper magnetic anisotropy and have a
remaining moment of magnetic field close to zero
magnetic field.

(57) Abstract:

COPYRIGHT: (C)1998,JPO

PROBLEM TO BE SOLVED: To optimize controllability in a central magnetic field region of a response curve by positioning an insulation tunnel layer between a fixed ferromagnetic layer and a free ferromagnetic layer on a board and positioning a non-ferromagnetic surface phase layer between an insulation tunnel layer and one of ferromagnetic layers.

SOLUTION: An Al_2O_3 tunnel/barrier layer 20 which can make a tunnel current flow in an almost vertical direction is provided between a fixed ferromagnetic layer 18 which is above a board 9 and is fixed in a proper direction when application magnetic field exists and a free ferromagnetic layer 32 wherein magnetization is freely rotative. Furthermore, a non-ferromagnetic surface phase layer 31 which weakens magnetic combination between the fixed ferromagnetic layer 18 and the free ferromagnetic layer 32 is inserted between the barrier layer 20 and the free ferromagnetic layer 32. When applied magnetic field is in a favorable range, the fixed ferromagnetic layer 18 contains a high coercive force material (ternary alloy such as CoPtCr)



(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平10-190090

(43) 公開日 平成10年(1998) 7月21日

(51) IntCl. ⁸	識別記号	F I
H 0 1 L 43/00		H 0 1 L 43/00
G 0 1 R 33/06		G 1 1 B 5/39
G 1 1 B 5/39		G 1 1 C 11/15
G 1 1 C 11/15		H 0 1 F 10/16
H 0 1 F 10/16		G 0 1 R 33/06
		Z
審査請求 未請求 請求項の徴21 O L (全 12 頁)		

(21) 出願番号 特願平9-276238

(22) 出願日 平成9年(1997)10月8日

(31) 優先権主張番号 08/758614

(32) 優先日 1996年11月27日

(33) 優先権主張国 米国 (US)

(71) 出願人 390009531

インターナショナル・ビジネス・マシーンズ・コーポレーション

INTERNATIONAL BUSINESS MACHINES CORPORATION

アメリカ合衆国10504、ニューヨーク州
アーモンク (番地なし)

(72) 発明者 スチュアート・ステファン・パップワース・パーキン

アメリカ合衆国95123、カリフォルニア州
サン・ホセ、ロイヤル・オーク・コート
6264

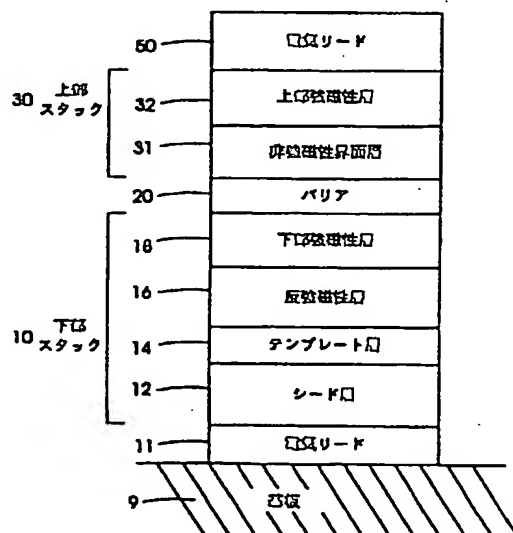
(74) 代理人 弁理士 坂口 博 (外1名)

(54) 【発明の名称】 磁気トンネル接合素子、接合メモリ・セル及び接合磁界センサ

(57) 【要約】

【課題】

【解決手段】 メモリ・セルや外部磁界センサとして使用可能な磁気トンネル接合素子のトンネル磁気抵抗応答は、印加磁界の関数として、ゼロ磁界を中心に事実上対称である。磁気トンネル接合は2つの強磁性層で構成され、1つはそのモーメントが固定され、もう1つはそのモーメントが自由に回転可能である。強磁性層の間の絶縁トンネル・バリア層により層に垂直にトンネル電流が流れる。トンネル・バリア層と強磁性層の1つの界面に非強磁性層が位置する。非強磁性層は界面のトンネル・バリア層と強磁性層の間隔を広げ、よって固定強磁性層と自由強磁性層の磁気結合を弱くする。この磁気結合は、ゼロ磁界回りの非対称なトンネル磁気抵抗応答の原因とされている。非強磁性界面層はトンネル・バリア層界面でスピン偏極していない電子状態を現すが、予想外にトンネル磁気抵抗を抑制する原因になることはない。



【特許請求の範囲】

【請求項1】印加磁界が存在するとき磁化が好適な方向に固定された固定強磁性層を含む第1電極と、

印加磁界が存在するとき磁化が自由に回転可能な自由強磁性層を含む第2電極と、

前記第1電極の固定強磁性層と、前記第2電極の自由強磁性層の間に位置し、前記固定強磁性層と自由強磁性層にほぼ垂直な方向にトンネル電流を流すことのできる絶縁トンネル層と、

前記絶縁トンネル層と前記強磁性層の1つの間に位置し且つそれらと接触して間隔を広げ、よって前記固定強磁性層と自由強磁性層の磁気結合を弱くする、非強磁性界面層と、

前記第1及び第2の電極、トンネル層、並びに非強磁性界面層が上側に形成された基板と、を含む、磁気トンネル接合素子。

【請求項2】前記固定強磁性層と自由強磁性層の磁化方向は、印加磁界がないとき互いに事実上平行または逆平行である、請求項1記載の磁気トンネル接合素子。

【請求項3】前記自由強磁性層の磁化方向は、印加磁界がないときピン止め強磁性層の磁化方向に対して事実上垂直である、請求項1記載の磁気トンネル接合素子。

【請求項4】前記第1電極の固定強磁性層と接触し、前記固定強磁性層の磁化をその好適な方向でピン止めする反強磁性層を含む、請求項1記載の磁気トンネル接合素子。

【請求項5】前記固定強磁性層は、印加磁界があるとき、その磁化がその固有の磁気異方性により固定されるのに十分な大きさの保磁力がある、請求項1記載の磁気トンネル接合素子。

【請求項6】前記第1電極は、前記基板と前記絶縁トンネル層の間に位置する、請求項1記載の磁気トンネル接合素子。

【請求項7】前記非強磁性界面層は、前記絶縁トンネル・バリア層と前記自由強磁性層の間に位置しそれらと接触した、請求項1記載の磁気トンネル接合素子。

【請求項8】前記自由強磁性層の物質は、Co、Coの合金、及びNiFeの合金で構成されたグループから選択される、請求項7記載の磁気トンネル接合素子。

【請求項9】前記非強磁性界面層の物質は、Cu、Ag、及びAuで構成されたグループから選択される、請求項1記載の磁気トンネル接合素子。

【請求項10】2つの磁気状態を有し、不揮発性磁気メモリ・アレイの個々のメモリ・セルの磁気状態を変化させ検出する読取り／書き込み回路に接続された該アレイに使用できる、磁気トンネル接合メモリ・セルであって、前記読取り／書き込み回路からの電流により生じた印加磁界があるときに好適な方向でモーメントが固定された固定強磁性層と、

前記読取り／書き込み回路からの電流により生じた印加磁

界にあるとき、前記固定強磁性層のモーメントに対してほぼ平行な方向と逆平行な方向の間でモーメントが自由に回転可能な自由強磁性層と、

前記固定強磁性層と前記自由強磁性層の間に位置し、前記固定強磁性層と自由強磁性層に対してほぼ垂直な方向にトンネル電流を流すことのできる絶縁トンネル・バリア層と、

前記絶縁トンネル・バリア層と前記強磁性層の1つの間に位置してそれらと接触し、間隔を広げ、よって前記固定強磁性層と自由強磁性層の磁気結合を弱くする非強磁性界面層と、を含む、

よって前記強磁性層が読取り／書き込み回路に接続されたとき、前記強磁性層に対してほぼ垂直な方向に前記絶縁トンネル・バリア層を流れる電流に対する電気抵抗は、前記自由強磁性層の平行なまたは逆平行なモーメントによって決定され、よって前記電気抵抗の値から前記メモリ・セルの磁気状態が決定可能である、

磁気トンネル接合メモリ・セル。

【請求項11】前記固定強磁性層と接触して、界面交換結合により前記固定強磁性層の磁化をその好適な方向にピン止めする反強磁性層を含む、請求項10記載の磁気トンネル接合メモリ・セル。

【請求項12】前記固定強磁性層は、印加磁界があるとき、その磁化がその固有の磁気異方性により固定されるのに十分な大きさの保磁力を持つ、請求項10記載の磁気トンネル接合メモリ・セル。

【請求項13】前記非強磁性界面層は、前記絶縁トンネル・バリア層と自由強磁性層の間に位置しそれらと接触した、請求項10記載の磁気トンネル接合メモリ・セル。

【請求項14】前記自由強磁性層の物質は、Co、Coの合金、及びNiFeの合金で構成されたグループから選択される、請求項13記載の磁気トンネル接合メモリ・セル。

【請求項15】前記非強磁性界面層の物質は、Cu、Ag、及びAuで構成されたグループから選択される、請求項10記載の磁気トンネル接合メモリ・セル。

【請求項16】外部磁界を検出する磁気トンネル接合磁界センサであって、

検出される外部磁界の範囲内の印加磁界があるとき、モーメントが好適な方向に固定される固定強磁性層と、印加磁界がないとき、モーメントが前記固定強磁性層のモーメントにほぼ垂直な方向を向き、検出される外部磁界の範囲内の印加磁界があるとき、モーメントが前記垂直な方向から離れるよう自由に回転可能な自由強磁性層と、

前記固定強磁性層と自由強磁性層の間に位置し、前記固定強磁性層と自由強磁性層に対してほぼ垂直な方向にトンネル電流を流すことのできる絶縁トンネル・バリア層と、

前記絶縁トンネル・バリア層と前記強磁性層の1つの間に位置し、それらと接触して、間隔を広げ、よって前記固定強磁性層と自由強磁性層の磁気結合を弱くする非強磁性界面層と、を含み

よって前記強磁性層が、検出される外部磁界の影響下にあるとき、前記自由強磁性層のモーメントは、前記固定強磁性層のモーメントに対してその向きを変え、前記強磁性層に対してほぼ垂直な方向の前記絶縁トンネル・バリア層を流れる電流に対する電気抵抗が変化し、よって外部磁界が検出可能になる、

磁気トンネル接合磁界センサ。

【請求項17】前記固定強磁性層と接触して、界面交換結合により前記固定強磁性層の磁化をその好適な方向にピン止めする反強磁性層を含む、請求項16記載の磁気トンネル接合センサ。

【請求項18】前記固定強磁性層は、検出される外部磁界の範囲内の磁界強度を持つ印加磁界があるとき、その磁化がその固有の磁気異方性により固定されるのに十分な大きさの保磁力を持つ、請求項16記載の磁気トンネル接合センサ。

【請求項19】前記非強磁性界面層は、前記絶縁トンネル・バリア層と自由強磁性層の間に位置してそれらと接触した、請求項16記載の磁気トンネル接合センサ。

【請求項20】前記自由強磁性層の物質は、Co、Coの合金、及びNiFeの合金で構成されたグループから選択される、請求項19記載の磁気トンネル接合センサ。

【請求項21】前記非強磁性界面層の物質は、Cu、Ag、及びAuで構成されたグループから選択される、請求項16記載の磁気トンネル接合センサ。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、メモリや外部磁界の検出に用いられる磁気トンネル接合(MTJ)素子に関し、特に磁界応答の制御性を改良したMTJ素子に関する。

【0002】

【従来の技術】磁気トンネル接合(MTJ)は、薄い絶縁層で分離された2つの強磁性電極を含む素子である。絶縁層は、強磁性電極間で電荷キャリアの量子力学的トンネル効果が起こるのに十分な薄さである。トンネル効果のプロセスは電子スピンのみに依存する。つまり接合部のトンネル電流は強磁性物質のスピンのみに依存する電子的性質に依存し、2つの強磁性電極の磁気モーメント(磁化方向)の相対的向きの関数である。2つの強磁性電極は、それらのモーメントの相対的向きを外部磁界で変えられるように、磁界に対する応答が異なるように設計される。

【0003】1993年以前の強磁性電極間のトンネル効果の実験結果が、R. Meserveyらによる"Spin-polariz

ed Electron Tunneling", Physics Reports, Vol. 238, pp. 214-217で解説されているが、室温ではせいぜい1%乃至2%のオーダーのごくわずかな応答しか示されていない。妥当と思われる大きさの応答を示しているのは、走査トンネル顕微鏡を用いた2つの実験だけである。1つは100%スピン偏極したCrO₂チップを採用し、室温で40%の偏極電流変調を示したが、これはR. Wiesendangerらによる"Observation of Vacuum Tunneling of Spin-polarized Electrons with the Scanning Tunneling Microscope", Physics Review Letters, Vol. 65, page 247 (1990) に述べられているとおりである。

【0004】磁気抵抗応答が18%とかなり大きいMTJ素子が、T. Miyazakiらによる"Giant Magnetic Tunneling Effect in Fe/Al₂O₃/Fe Junction", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 139, No. L231 (1995) で報告されている。しかし著者が報告しているのは、結果としての18%の磁気抵抗を再現できなかったということである。同時期に作製された他の接合は、応答がわずか1%乃至6%である。この他の報告によると、MTJ素子の磁気抵抗はCoFe/Al₂O₃/Coの大きな接合部で室温で最大18%であり、これはJ. S. Mooderaらによる"Large Magnetoresistance at Room Temperature in Ferromagnetic Thin Film Tunnel Junctions", Physics Review Letters, Vol. 74, page 3273 (1995)、及びJ. S. Moodera, L. S. Kinderによる"Ferromagnetic-Insulator-Ferromagnetic Tunneling: Spin Dependent Tunneling and Large Magnetoresistance in Trilayer Junctions", Journal of Applied Physics, Vol. 79, page 4724 (1996) に述べられている。

著者らは、表面あらさの減少がよい結果をもたらす鍵であるとの仮説を立てた。これを実現するため、ベース電極の成長をみる極端な尺度に依り、低温工学的に冷却した基板への蒸着、シード層の使用及びベース電極をきわめて薄くする処理を組み合わせた。Al層を低温工学的に冷却してからこれを暖め、プラズマ酸化させ、Alのほとんどを消費することによってトンネル・バリアが形成された。これらの文献の最初のものでは、室温で最大の接合磁気抵抗変化が観測されたのは11.8%と報告されている。次の文献では、室温で最大の接合磁気抵抗変化は18%と報告され、多くの接合部に、室温で14%乃至17%の範囲の磁気抵抗変化があったと報告されている。接合抵抗は、断面積が200×300μm²の接合部で数百Ωから数十kΩの範囲だった。

【0005】従って、MTJ素子を有益な程度まで大きい磁気抵抗応答をもたせて室温で作製することが困難であることは明らかである。室温での予測された大きさの磁気抵抗応答の最初の観測はスピン偏極した走査トンネル顕微鏡で行われた。従来技術では後に、予測された大きさのMTJ応答を室温で再現可能に実現したのは、Mo

oderaと協力者だけである。ただしこれは、風変わりで非実際的な薄膜被着法を用いて作製された大きい素子についてのみであった。

【0006】従来の技術のMTJ素子に見られる他の問題は、磁気抵抗応答と磁界が、磁界に対して理想的なステップ状の応答を示していないことである。T. Hiyazakiらによる"Large Magnetoresistance Effect in 82Ni-Fe/Al-Al₂O₃/Co Magnetic Tunneling Junction", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 98, No. L7 (1991) は、ステップ状の磁気抵抗応答をどのようにして実現することができたかを示しているが、これは限定された印加磁界範囲に関してのみである。印加磁界の偏位が瞬間的に大きすぎる場合、磁気抵抗応答特性は反転し得る。

【0007】最近、IBMの1996年3月18日付け米国特許出願番号第08/618300号では、MTJ素子の2つの強磁性層の1つを磁気的に硬化する、または磁気的にピン止めするため、反強磁性交換バイアス層を使用することにより、室温磁気抵抗応答が大きく、磁気応答が制御されたMTJ素子を作製する方法が明らかにされている。このMTJ素子は、磁気信号に対する磁気抵抗応答が曖昧ではなく制御され、大量生産が可能であり、ディーブ・サブミクロン寸法までスケール・ダウンすることができる。ただしステップ状応答は、小さい正磁界と負磁界に対して対称ではないことがあり、小さい磁界によりゼロ磁界から外れることがある。これが望ましくないのは、MTJメモリ・セルには、ゼロ磁界で2つの十分に画成された磁気状態（及び対応する抵抗値）のあることが重要だからである。

【0008】

【発明が解決しようとする課題】本発明の目的は、応答曲線がその中央の磁界領域で制御され最適化されたMTJ素子を提供することである。

【0009】

【課題を解決するための手段】本発明は、印加磁界の関数として、事実上の中心がゼロ磁界にあるトンネル磁気抵抗応答を持つメモリ・セルまたは外部磁界センサとして使用できるMTJ素子である。磁気トンネル接合は2つの強磁性層を含み、1つは磁気モーメントが固定され、もう1つは磁気モーメントが自由に回転可能にされる。MTJはまた、強磁性層間にトンネル電流が層内を垂直に流れるようにする、絶縁トンネル・バリア層と、トンネル・バリア層と強磁性層の1つの間の界面に位置付けられる非強磁性層を含む。非強磁性層は界面のトンネル・バリア層と強磁性層の間隔を広げ、従って固定強磁性層と自由強磁性層の磁気結合を弱くする。磁気結合は、ゼロ磁界を中心として非対称なトンネル磁気抵抗応答の原因とされている。非強磁性界面層は、トンネル・バリア層界面でスピン偏極しない電子状態を現すが、不意にトンネル磁気抵抗を抑制する原因になることはな

い。

【0010】

【発明の実施の形態】本発明を理解するために、IBMの出願にあるようなMTJ素子について、最初に図1乃至図8を参照しながら説明する。図1、図2は、先に引用した出願に書かれているような磁気メモリ・セルの用途に適したMTJ構造を示す。図1に断面を、図2に平面を示したこの構造は、基板9、ベース電極多層スタック10、絶縁トンネル・バリア層20、上部電極スタック30、コンタクト・ホールが貫通した絶縁層40、及びそれ自体を多層構造とすることができるコンタクトと上部配線層50を含む。トンネル・バリア層20は2つの強磁性層スタック10、30にサンドイッチのように挟まれている。

【0011】基板9上に形成されるベース電極層スタック10は、基板9上に被着される第1シード層12、シード層12上の"テンプレート"強磁性層14、テンプレート層14上の反強磁性物質の層16、及び下の反強磁性層16上に形成され、それと交換結合した"ピン止め"強磁性層18を含む。強磁性層18がピン止め層と呼ばれるのは、その磁気モーメント（磁化方向）がMTJ素子にとっては所望の利点となる程度の印加磁界の存在により回転しなくなるからである。上部電極スタック30は、"自由（フリー）"強磁性層32と自由層32上に形成された保護層34を含む。強磁性層32のモーメントは交換結合ではピン止めされず、従って、利点の範囲の印加磁界、つまりMTJ素子がメモリ・アレイのセルであるとき、書き込み電流による（また、MTJ素子が磁気記録ヘッドのMR読取りセンサであるとき磁気的に記録されたデータによる）磁界が存在するとき自由に回転する。電極スタック10、30の強磁性層18、32は両方とも、磁化容易方向がベース電極10の延長部11、13（図2）として形成される下部配線層の長さに対して平行な、同じ方向で互いにほぼ平行になるように作製される。この方向は図2では矢印33で示してある。絶縁層40には、上部接合電極スタック30の上部まで貫通した自己整合コンタクト・ホールがある。スタック10内のトンネル・バリア層20の真下のピン止め強磁性層18は、その磁化が直下の反強磁性層16との界面交換結合によりピン止めされる。反強磁性層16はまたベース電極スタック10の一部をなす。セルの書き込みや読取りの操作でメモリ・セルに印加される磁界に匹敵する大きさの磁界については、ピン止め強磁性層18の磁化の向きとして考えられるのは1つだからである。上部電極スタック30の自由強磁性層32は磁化特性が異方性であるが、その磁化方向またはベクトルはピン止めされない。むしろその磁化ベクトルは、所望の範囲の磁界を印加することによって容易な方向のいずれの方向に沿っても安定に配向可能である。

【0012】図3は、ベース電極スタック10'、絶縁

トンネル・バリア層20'及び上部電極スタック30'の断面積が全て同じである点を除いて、図1と同様のMTJメモリ・セルの断面を示す。ベース電極スタック10'は、基板9上に形成された配線リード11'上に形成される。絶縁層40'はMTJ素子全体を囲み、リード11'まで延びる。この構造によりダイオード、トランジスタ等の電子素子の上部にメモリ・セルを容易に作製でき、個々の磁気セルを通して検出電流が操作される。

【0013】MTJメモリ・セルが読取り/書込み回路に接続されたメモリ・セルのアレイにあるとき、セルへの書込みは、上部(50)と下部(11、13)の電極配線層(図1、図2)に書込み電流を流すことによって(またはMTJセル付近に位置するこれら、或いは他の書込み線やビット線の組み合わせに電流を流すことによって)行われる。これらのライン両方に十分に大きい電流が流れるとき、自由強磁性層32付近に生じる組み合わせ磁界により、自由強磁性層32の磁化方向がピン止め強磁性層18の磁化方向に対して平行から逆平行(またはその逆に)に回転する。電流のレベルは、それらが生成する組み合わせ磁界が自由強磁性層のスイッチング磁界を超えるように選択される。自由強磁性層のスイッチング磁界は、固有のものと磁界内で膜を成長させることにより、また自由強磁性層と固定強磁性層の静磁結合により生じるものの両方の、自由強磁性層の磁気異方性を含めた複数の要因によって決定される。組み合わせ書込み電流により生じるこの磁界は、ピン止め強磁性層の磁化を回転させるのに必要な磁界よりかなり小さくなるよう選択される。書込み電流は、配線層50及び11、13に比べて抵抗が大きいMTJを垂直方向には流れない。MTJメモリ・セルは、ピン止め強磁性層からトンネル接合バリアを経て自由強磁性層(またはその逆に)MTJに垂直に検出電流を流すことによって読取られる。メモリ・セルの状態は、書込み電流よりかなり小さい検出電流がMTJに垂直に流れたときのメモリ・セルの抵抗を測定することによって決定される。この検出電流または読取り電流の自己磁界は無視でき、メモリ・セルの磁気状態に影響を与えない。

【0014】トンネル・バリアでの電荷キャリアのトンネル効果の可能性は、2つの強磁性層のモーメントの相対的アラインメントに依存する。トンネル電流はスピン偏極する。つまり一方の強磁性層から流れる電流は、1つのスピン型(強磁性層の磁化方向によりスピン・アップまたはスピン・ダウン)の電子が支配的構成要素である。電流のスピン偏極の程度は、強磁性層とトンネル・バリアの界面での強磁性層を構成する磁気物質の電子特性によって決定される。第1強磁性層は従ってスピン・フィルタとして働く。電荷キャリアのトンネル効果の可能性は、第2強磁性層の電流のスピン偏極と同じスピン偏極の電子状態が得られるかどうかによって依存する。通常、第2強磁性層のモーメントが、第1強磁性層のモーメント

トに平行なときは、第2強磁性層のモーメントが第1強磁性層のそれに逆平行に整列しているときよりも多くの電子状態が得られる。従って電荷キャリアのトンネル効果可能性は、両方の層のモーメントが平行なとき最大で、モーメントが逆平行なとき最低である。モーメントが平行であれ逆平行であれ配列されるとき、トンネル効果可能性は中間値をとる。従ってMTJメモリ・セルの電気抵抗は、電流のスピン偏極と両方の強磁性層の電子特性に依存する。その結果、自由強磁性層の2つの可能な磁化方向により、メモリ・セルの2つの可能なビット状態(0または1)が一意に定義される。

【0015】図4、図5はそれぞれ、先に引用したIBMの出願に述べられているように外部磁界センサとして用いられるMTJ素子の断面と平面を示す。構造はMTJメモリ・セル素子に似ているが、上部接合電極スタック70は、トンネル・バリア層20に隣接した強磁性層72を含む。トンネル・バリア層20の磁化容易方向は、下部電極スタック10のピン止め強磁性層18の磁化に対して平行ではなく垂直に並ぶ。これによりMTJ素子は、磁気記録ディスク等の磁性媒体から磁気的に記録されたデータを検出するセンサとして働く。上部配線層50は平坦化絶縁層40により接合部から隔離し、上部電極スタック70の保護層74と接触している。MTJメモリ・セルについて先に述べたように、印加外部磁界が弱い場合、下部電極10の強磁性層18の磁化方向(矢印19)はピン止めされ、自由強磁性層72の磁化方向(矢印73)は、矢印19の方向に向かうかまたはそこから離れるよう基板9の平面で自由回転する。

【0016】MTJメモリ・セルとMTJ磁界センサは両方とも共通の要素、下部電極10、上部電極20及びトンネル・バリア30を含む。これら共通要素をここでは"MTJ要素"とよぶ。先に述べたメモリや磁界検出に使用するMTJ要素の基本薄膜構造は、層の順序やそれらの組成に関しては同じである。先に示した基本MTJ要素を構成する層が図6に示してある。この要素は、電気リード層11としての5nmのTaと10nmのCu/テンプレート層14としての4nmのNi₆₀Fe₄₀/反強磁性層16としての10nmのMn₅₄Fe₄₆/下部強磁性層18としての6nmのNi₆₀Fe₄₀と2nmのCoで構成される下部電極スタック10を持つ。Cu層はシード層12としても働く。トンネル・バリア20は120秒プラズマ酸化した1.2nm厚のAl層である。上部電極スタック30は、それぞれ上部強磁性層32、電気リード50としての20nmのNi₆₀Fe₄₀/20nmのCuで構成され、保護層(図1の層34)を必要としない。この要素は、最初に基板の表面に平行に印加される磁界で下部電極10を被着することによって作製される。この磁界は、最初4nmのNiFe層14の容易方向を配向するよう働く。NiFe層14は、Mn₅₄Fe₄₆反強磁性層16を配向するテンプレートとし

て働く。層16は、6nmのNi₆₀Fe₄₀/2nmのCo強磁性層18の磁化方向を交換結合によりピン止める。次に、トンネル・バリア層20が、1.2nmのAl層を被着し、次にプラズマ酸化して公称Al₂O₃の層を形成することによって形成される。その後、上部電極スタック30が形成される。様々な層が従来のスパッタリング法を用いたDCマグネトロン・スパッタ蒸着により室温で基板と被着される。通常、被着速度はAlを除く全ての層で2Å/秒、Alは1Å/秒で被着される。Alで被着速度が低いとAl層が平滑になる。下部電極スタック10の層が平滑であること、またAl₂O₃層20に、他の場合は接合部を電氣的に短絡させるピンホールがないことは重要である。

【0017】図7は、磁界がMTJ要素の層に対して平行に要素の磁気容易方向に沿って印加されたとき、図6のMTJ要素のトンネル抵抗(磁気抵抗MR)の変化を示す。抵抗はトンネル・バリア20に沿って層に垂直に電流を流すことによって測定される。図7に示すように、ゼロ磁界付近で素子の抵抗が大きく変化する。これは上部電極30の中の自由強磁性層32のモーメントによって生じ、下部電極10の中のピン止め強磁性層18のモーメントに対してその向きが変化する。正磁界では、自由強磁性層とピン止め強磁性層のモーメントは互いに平行であるが、小さい負磁界では、モーメントは互いにほぼ逆平行であり、MTJ要素の抵抗は、正磁界の抵抗より約20%大きい。負磁界が更にかなり大きくなり、Mn-Fe反強磁性ピン止め層16の単方向交換バイアス磁界H_Bに対応すると、ピン止め強磁性層18のモーメントは結局、印加磁界に対して平行になり、従って上部電極30の自由強磁性層32のモーメントに対して平行になるよう回転し、よって要素の抵抗が減少する。

【0018】図7に示した応答に対するMTJ要素の動作範囲は、メモリ・セル、磁界検出いずれの用途でも、H_Bに比べて小さい磁界に制限される。図8に小さい磁界での要素の詳細な挙動を示す。磁界が容易方向に沿って印加されたとき、自由強磁性層32のモーメントの回転に何らかのヒステリシスがある。より重要なことは、図8からわかるように、抵抗と磁界の曲線がゼロ磁界を中心にしておらず、小さい負磁界の方へずれていることである。この磁界、結合磁界H_Jは図8で約-7.5Oeである。自由強磁性層のモーメントの磁気ヒステリシス・ループの非対称性は、ピン止め層18のモーメントの磁気結合に対する自由層32のモーメントのそれにより生じる。この相互作用磁界の兆候は、自由強磁性層とピン止め強磁性層の強磁性結合で一貫している。このような結合を説明するメカニズムはいくつか考えられる。こうしたメカニズムのほとんどは外因性であり、構造的欠陥や、強磁性層の理想的な平坦層からのずれに関係する。結合の原因になるのは、トンネル・バリア内のピン

ホールである。ただしこれは想定しにくいメカニズムである。というのはピン止め強磁性層と自由強磁性層の強磁性交換結合を起こすほど大きいピンホールは、トンネル・バリアによる電氣的短絡、及びトンネル・バリアの抵抗と磁気抵抗の減少につながりやすい。もう1つ起こり得る、比較的想定しやすいメカニズムは、最初はLouis Neel (L. Neel, "Sur un nouveau mode de couplage entre les aimantations de deux couches minces ferrimagnetiques", Comptes Rendues, Vol. 255, pp. 1676-1681, 1962) により提案された"オレンジの皮"メカニズムと呼ばれるものである。このモデルでは、図9に示すように、自由強磁性層とピン止め強磁性層の界面のあらさまたは波状性に相関が必要である。あらさの相関は静磁結合を介して、トンネル・バリアに強磁性結合を引き起こす。振幅r、波長λの強磁性層界面の2次元正弦あらさの場合、結合は次式により記述される。

$$【数1】 J = (\pi^2 / 2l^2) (r^2 / \lambda) (\mu_0 M_F M_P) \exp(-2\pi 2l^2 t / \lambda)$$

【0019】ここでμ₀は物質定数(真空の透過率)、tは強磁性層間の平均間隔、M_FとM_Pはそれぞれ自由強磁性層、ピン止め強磁性層の磁化である。従って"オレンジの皮"結合は、モーメントの増加及び強磁性界面層のあらさ、または強磁性層の分離の低下につれて増加する。

【0020】図7、図8の応答のような、構造の断面透過電子顕微鏡(XTEM)写真を見ると、Al₂O₃トンネル・バリアにかなりのあらさがある。例えば10nmのSi/10nmのPt/4nmのNi₈₁Fe₁₉/10nmのMn₅₀Fe₅₀/8.5nmのNi₈₁Fe₁₉/600秒酸化した1.3nmのAl/15nmのCo₉₀Fe₁₀/10nmのPtという形の構造で、XTEMからわかることは酸化したAl層の公称組成物Al₂O₃は、厚み1.7nmで厚みの変動は大きく約±0.8nmである。同様に10nmのSi/10nmのPt/4nmのNi₈₁Fe₁₉/10nmのMn₅₄Fe₄₆/10nmのNi₈₁Fe₁₉/600秒酸化した3nmのAl/20nmのCo/10nmのPt、及び比較的厚みのあるAl₂O₃層という形の構造で、Al₂O₃の厚みに変動がみられた。このスケールの界面あらさは、XTEM顕微鏡写真を考慮した10-50nmの範囲のλの適正值を使用して"オレンジの皮(orange peel)"モデル内で観測されたH_Jの値を説明し得る。

【0021】メモリ・セルや磁界検出に用いられるMTJ要素の性能は、強磁性相互作用磁界の存在により劣化し得る。メモリ・セルの用途では、自由強磁性層の磁化方向を変えることによって(ピン止め層のモーメントについては+か-)、メモリ・セルの状態が"0"と"1"の間で変化する。所要磁界は、隣接した書き込み線とビット線を同時に流れる書き込み電流の自己磁界から得られる。普通これらの線の1つは1方向、もう1つは双方向であ

る。双方向線を流れる電流の方向がメモリ・セルの状態を決定する。自由層のモーメントを+から-に回転させるため必要な磁界が、-から+へモーメントを回転させるため必要な磁界と異なる場合、メモリ素子の動作はより複雑になるか、または書き込みマージンを大きくしなければならないか、いずれかである。図8に示してあるデータの場合、MTJ要素はメモリ・セルとして性能が劣化しているが、これは大きい結合磁界の結果として、ゼロ磁界に十分に画成された磁気及び対応する抵抗の2つの状態がないからである。

【0022】MTJ要素の線形抵抗と磁界応答が必要な磁気記録読取りヘッド等、磁界検出用途の場合、自由磁気層とピン止め磁気層の相互作用磁界 H_i は、自由強磁性層とピン止め強磁性層のモーメントの静磁結合磁界 H_m とバランスがとれなければならない。MTJ要素の抵抗を検出するため必要な電流がかなり小さいMTJ要素の場合、検出電流の自己磁界は、 H_i や H_m に比べて無視できるほど小さい。 H_m は一般には、MTJ素子の格子サイズが小さくなると増加する（自由強磁性層とピン止め強磁性層の面積が同じと仮定したとき）。従って、 H_i の値を小さくすることが必要な場合がある。メモリ用途でも磁界検出用途でも、 H_i の制御が重要であり、その値を小さくし得るという可能性が求められる。

【0023】本発明は、結合磁界 H_i を大幅に縮小したMTJ素子である。このMTJ素子を構成する層を図10に示している。これは図6のMTJ素子と比較できる。トンネル・バリアの上部と自由強磁性層の間の界面に薄い非強磁性層31が用いられる。“オレンジの皮”結合モデルによると、ピン止め磁性層と自由磁性層の分離 t を大きくすると、強磁性相互作用、 H_i が低下する。この概略は図15に示した。図11乃至図13に本発明に従った、厚みがそれぞれ2Å、8Å、20ÅのCuの非強磁性界面層を持つMTJ要素について、ゼロ磁界付近の典型的な磁気抵抗曲線を示している。これらのMTJ素子は、他の場合は図8の応答を生じたMTJ素子と同一である。図からわかるように、自由強磁性層の磁気ヒステリシス・ループは、Cu厚みが約20Åでゼロ磁界回りで対称になる。 H_i はCu層の厚みが増すにつれて規則的に減少する。従って H_i の大きさは制御可能に可変であり、値を小さくすることができる。

【0024】図14は、Cu界面層のトンネル磁気抵抗の大きさと厚みの依存性を詳しく示している。トンネル磁気抵抗の大きさは、Cu界面層の厚みが小さくなるにつれて減少するが、Cu層が約10nmの厚みになると事実上、均一になる。Cu厚みに対するMRの依存性は、式 $MR \sim \exp(-t_i/\beta_i)$ によって表せる。ここで t_i は界面層の厚み、 β_i は指数遅延時間である。

【0025】図6のMTJ要素のトンネルMRは、一般にはトンネル・バリアの1側面の充填状態からのスピン偏極した電子のバリアの反対側の空き状態へのトンネル

効果によると説明される。この関連状態は、界面のきわめて短い距離（1-2原子層）内に局所化されると広く考えられている。従って、スピン偏極していない電子状態の非強磁性金属層を挿入することは、このような見方からは、トンネルMRの急速な抑制をもたらすはずである。しかし図14示すように、実際にはそうならないことは明らかである。1つ考えられる説明は、トンネル・バリアがかなりあらく、Cu層の成長もあらいというものである。その際、観測されたMRは、Cuで覆われていない Al_2O_3 層の部分による。しかしこれでは、オレンジの皮結合の値が更に大きくなる原因になる。自由強磁性層の界面あらさが増加するからである。もう1つ考えられる説明は、トンネル・バリア及びCu界面層を伝播する電子は、かなりの距離はスピン偏極を保持し、結果として、新たに作られたCuと自由強磁性層の界面にてスピンに依存する形で散乱するということである。このようなモデルでは、関連する金属多層構造で巨大な磁気抵抗（GMR）を示す非強磁性界面層物質と自由強磁性層物質の組み合わせが、提案されたMTJ要素にとって最も有益な物質であろう。

【0026】次の表は、種類と厚みが様々な強磁性層の測定値から求められたもので、強磁性層の様々なMTJの磁気抵抗応答の大きさが、非強磁性スペーサ層の厚みが増加するにつれて低下する遅延時間 β_i の値を示す。下部スタック10は、どの構造についても同一であり、図6のものと同じである。

【表1】

非強磁性界面層	強磁性層	遅延時間 β (Å)
Al	Co	2.76
Al	Ni ₄₀ Fe ₆₀	2.27
Cr	Co	2.7
Pt	Co	7.8
Au	Co	8.4
Au	Ni ₈₁ Fe ₁₉	7.5
Ag	Co	30.8
Ag	Ni ₄₀ Fe ₆₀	40.0
Cu	Co	36.9
Cu	Ni ₄₀ Fe ₆₀	30.5
Cu	Ni ₈₁ Fe ₁₉	30.0

【0027】表1からわかるように、提案されたモデルとも一致するが、最も長い遅延時間はGMR値が大きく、Co及びNiFeの様々な自由強磁性層を持つ金属界面層、つまりCu、Ag及びAuに見られる。かなり短い遅延時間が見られるのは、Co及びNiFeの自由強磁性層を持つAl、及びCoの自由強磁性層を持つCrである。これら後者の組み合わせはまた関連する金属多層構造でかなり小さいGMRを示す。

【0028】ここで述べ図に示した（図10）本発明のMTJ素子は、反強磁性ピン止め層として面心立方（fcc）Mn-Feの成長を促すため、反強磁性交換バイ

アス層16を適切な下位層上に成長させれば、強磁性パーマロイ・テンプレート層14を使用せずに形成できる。Mn-Feの結晶学上の構造は形成の方法と条件に応じていくつか存在する。fccのMn-Feだけは室温で交換バイアスを起こす。ほかの適切な反強磁性交換バイアス物質としては、例えばNi-Mn、Mn-Ir、Mn-Ptの合金が使用できる。

【0029】ここに述べ、また図10に示したMTJ素子は、Al₂O₃トンネル・バリア層20の上部と自由強磁性層32の間に非強磁性層が挿入されるが、素子はまた、ピン止め強磁性層18とトンネル・バリア層20の間に非強磁性層を挿入しても形成できる。同様に、ここに述べ図示した本発明のMTJ素子は、基板付近の下部にピン止め強磁性層18を持つが、素子はまた最初に自由強磁性層32を被着し、次にトンネル・バリア層20、ピン止め強磁性層18及び反強磁性層16を被着することによっても形成できる。このようなMTJ素子は、層が基本的には図10に示したMTJ素子とは反転した形になる。非強磁性層はまた、このような反転したMTJ素子のトンネル・バリア層のいずれの側面にも挿入できる。またトンネル・バリア層界面に非強磁性層を持つ本発明のMTJ素子は、ピン止め強磁性層のモーメントが、図16に示すような、反強磁性層との界面交換結合以外の手法により固定される部分に使用することができる。この実施例の場合、固定強磁性層18は、印加磁界が好都合な範囲にあるとき、この層のモーメントが基本的に、その固有の磁気異方性により固定またはピン止めされるように、保磁力の高い強磁性物質を含む。また層18のこの強磁性物質はゼロ磁界に近い磁界の残留モーメントがなければならず、これは、大きい磁界でのこの物質のモーメントの主要な部分である。適切な強磁性物質は、Co及びCoPtCrの三元合金(Co₇₅Pt₁₂Cr₁₃等)、CoCrTaの三元合金、CoPtの二元合金等、他の元素との合金である。図16に示すように、層18の磁性は、それが成長するシード層12により影響を受け得る。例えばCoPtCrに適切なシード層はCrの層である。

【0030】まとめとして、本発明の構成に関して以下の事項を開示する。

【0031】(1) 印加磁界が存在するとき磁化が好適な方向に固定された固定強磁性層を含む第1電極と、印加磁界が存在するとき磁化が自由に回転可能な自由強磁性層を含む第2電極と、前記第1電極の固定強磁性層と、前記第2電極の自由強磁性層の間に位置し、前記固定強磁性層と自由強磁性層にほぼ垂直な方向にトンネル電流を流すことのできる絶縁トンネル層と、前記絶縁トンネル層と前記強磁性層の1つの間に位置し且つそれらと接触して間隔を広げ、よって前記固定強磁性層と自由強磁性層の磁気結合を弱くする、非強磁性界面層と、前記第1及び第2の電極、トンネル層、並びに非強磁性界

面層が上側に形成された基板と、を含む、磁気トンネル接合素子。

(2) 前記固定強磁性層と自由強磁性層の磁化方向は、印加磁界がないとき互いに事実上平行または逆平行である、前記(1)記載の磁気トンネル接合素子。

(3) 前記自由強磁性層の磁化方向は、印加磁界がないときピン止め強磁性層の磁化方向に対して事実上垂直である、前記(1)記載の磁気トンネル接合素子。

(4) 前記第1電極の固定強磁性層と接触し、前記固定強磁性層の磁化をその好適な方向でピン止めする反強磁性層を含む、前記(1)記載の磁気トンネル接合素子。

(5) 前記固定強磁性層は、印加磁界があるとき、その磁化がその固有の磁気異方性により固定されるのに十分な大きさの保磁力がある、前記(1)記載の磁気トンネル接合素子。

(6) 前記第1電極は、前記基板と前記絶縁トンネル層の間に位置する、前記(1)記載の磁気トンネル接合素子。

(7) 前記非強磁性界面層は、前記絶縁トンネル・バリア層と前記自由強磁性層の間に位置とそれらと接触した、前記(1)記載の磁気トンネル接合素子。

(8) 前記自由強磁性層の物質は、Co、Coの合金、及びNiFeの合金で構成されたグループから選択される、前記(7)記載の磁気トンネル接合素子。

(9) 前記非強磁性界面層の物質は、Cu、Ag、及びAuで構成されたグループから選択される、前記(1)記載の磁気トンネル接合素子。

(10) 2つの磁気状態を有し、不揮発性磁気メモリ・アレイの個々のメモリ・セルの磁気状態を変化させ検出する読取り/書き込み回路に接続された該アレイに使用できる、磁気トンネル接合メモリ・セルであって、前記読取り/書き込み回路からの電流により生じた印加磁界があるときに好適な方向でモーメントが固定された固定強磁性層と、前記読取り/書き込み回路からの電流により生じた印加磁界にあるとき、前記固定強磁性層のモーメントに対してほぼ平行な方向と逆平行な方向の間でモーメントが自由に回転可能な自由強磁性層と、前記固定強磁性層と前記自由強磁性層の間に位置し、前記固定強磁性層と自由強磁性層に対してほぼ垂直な方向にトンネル電流を流すことのできる絶縁トンネル・バリア層と、前記絶縁トンネル・バリア層と前記強磁性層の1つの間に位置してそれらと接触し、間隔を広げ、よって前記固定強磁性層と自由強磁性層の磁気結合を弱くする非強磁性界面層と、を含み、よって前記強磁性層が読取り/書き込み回路に接続されたとき、前記強磁性層に対してほぼ垂直な方向に前記絶縁トンネル・バリア層を流れる電流に対する電気抵抗は、前記自由強磁性層の平行なまたは逆平行なモーメントによって決定され、よって前記電気抵抗の値から前記メモリ・セルの磁気状態が決定可能である、磁気トンネル接合メモリ・セル。

(11) 前記固定強磁性層と接触して、界面交換結合により前記固定強磁性層の磁化をその好適な方向にピン止めする反強磁性層を含む、前記(10)記載の磁気トンネル接合メモリ・セル。

(12) 前記固定強磁性層は、印加磁界があるとき、その磁化がその固有の磁気異方性により固定されるのに十分な大きさの保磁力を持つ、前記(10)記載の磁気トンネル接合メモリ・セル。

(13) 前記非強磁性界面層は、前記絶縁トンネル・バリア層と自由強磁性層の間に位置しそれらと接触した、前記(10)記載の磁気トンネル接合メモリ・セル。

(14) 前記自由強磁性層の物質は、Co、Coの合金、及びNiFeの合金で構成されたグループから選択される、前記(13)記載の磁気トンネル接合メモリ・セル。

(15) 前記非強磁性界面層の物質は、Cu、Ag、及びAuで構成されたグループから選択される、前記(10)記載の磁気トンネル接合メモリ・セル。

(16) 外部磁界を検出する磁気トンネル接合磁界センサであって、検出される外部磁界の範囲内の印加磁界があるとき、モーメントが好適な方向に固定される固定強磁性層と、印加磁界がないとき、モーメントが前記固定強磁性層のモーメントにほぼ垂直な方向を向き、検出される外部磁界の範囲内の印加磁界があるとき、モーメントが前記垂直な方向から離れるよう自由に回転可能な自由強磁性層と、前記固定強磁性層と自由強磁性層の間に位置し、前記固定強磁性層と自由強磁性層に対してほぼ垂直な方向にトンネル電流を流すことのできる絶縁トンネル・バリア層と、前記絶縁トンネル・バリア層と前記強磁性層の1つの間に位置し、それらと接触して、間隔を広げ、よって前記固定強磁性層と自由強磁性層の磁気結合を弱くする非強磁性界面層と、を含み、よって前記強磁性層が、検出される外部磁界の影響下にあるとき、前記自由強磁性層のモーメントは、前記固定強磁性層のモーメントに対してその向きを変え、前記強磁性層に対してほぼ垂直な方向の前記絶縁トンネル・バリア層を流れる電流に対する電気抵抗が変化し、よって外部磁界が検出可能になる、磁気トンネル接合磁界センサ。

(17) 前記固定強磁性層と接触して、界面交換結合により前記固定強磁性層の磁化をその好適な方向にピン止めする反強磁性層を含む、前記(16)記載の磁気トンネル接合センサ。

(18) 前記固定強磁性層は、検出される外部磁界の範囲内の磁界強度を持つ印加磁界があるとき、その磁化がその固有の磁気異方性により固定されるのに十分な大きさの保磁力を持つ、前記(16)記載の磁気トンネル接合センサ。

(19) 前記非強磁性界面層は、前記絶縁トンネル・バリア層と自由強磁性層の間に位置してそれらと接触した、前記(16)記載の磁気トンネル接合センサ。

(20) 前記自由強磁性層の物質は、Co、Coの合金、及びNiFeの合金で構成されたグループから選択される、前記(19)記載の磁気トンネル接合センサ。

(21) 前記非強磁性界面層の物質は、Cu、Ag、及びAuで構成されたグループから選択される、前記(16)記載の磁気トンネル接合センサ。

【図面の簡単な説明】

【図1】先に引用した出願に従い、メモリ・セルに用いるため構成され、MTJ素子を囲む絶縁物質内に自己整合コンタクト・ホールを持つMTJ素子の断面図である。

【図2】先に引用した出願に従い、メモリ・セルに用いるため構成され、MTJ素子を囲む絶縁物質内に自己整合コンタクト・ホールを持つMTJ素子の平面図である。

【図3】平坦化された自己整合コンタクト・ホールを持ち、MTJの全ての層が同じ隣接したサイド・エッジを持つ、図1と同様のMTJ素子の断面図である。

【図4】先に引用した出願に従い、磁界検出に用いるため構成され、平坦化された自己整合コンタクト・ホールを持つMTJ素子の断面図である。

【図5】先に引用した出願に従い、磁界検出に用いるため構成され、平坦化された自己整合コンタクト・ホールを持つMTJ素子の平面図である。

【図6】図1のMTJ素子を構成する層の図である。

【図7】図6のMTJ素子の典型的な磁気抵抗応答曲線を示す図である。

【図8】図7の磁気抵抗応答曲線のゼロ磁界付近の領域を拡大し、応答がゼロ磁界を中心にしていない様子を示す図である。

【図9】層の平坦性がないことによるMTJ素子の強磁性層間の“オレンジの皮”結合を示す図である。

【図10】図6のMTJ素子の図と比較するため、本発明のMTJ素子を構成する層を示す図である。

【図11】図8と比較するため、トンネル・バリア層に隣接したCuの非強磁性界面層の厚みに関して、本発明のMTJ素子のゼロ磁界付近の領域での磁気抵抗応答曲線を示す図である。

【図12】図8と比較するため、トンネル・バリア層に隣接したCuの非強磁性界面層の厚みに関して、本発明のMTJ素子のゼロ磁界付近の領域での磁気抵抗応答曲線を示す図である。

【図13】図8と比較するため、トンネル・バリア層に隣接したCuの非強磁性界面層の厚みに関して、本発明のMTJ素子のゼロ磁界付近の領域での磁気抵抗応答曲線を示す図である。

【図14】Cu界面層の厚みの関数として、本発明のMTJのトンネル磁気抵抗を示す図である。

【図15】図9と比較するため、層の平坦性がないことによるMTJ素子の強磁性層間の“オレンジの皮”結合に

17

18

対する非強磁性界面層の影響を示す、本発明のMTJ層の図である。

【図16】固定強磁性層として保磁力の高いハード強磁性層を持つ、本発明のMTJ素子の図である。

【符号の説明】

9 基板

10、10' ベース電極多層スタック

11、11'、13 延長部

12 第1シード層

14 テンプレート強磁性層

16 反強磁性層

18 ピン止め強磁性層

20、20' 絶縁トンネル・バリア層

30、30' 上部電極スタック

31 非強磁性層

32 自由強磁性層

34 保護層

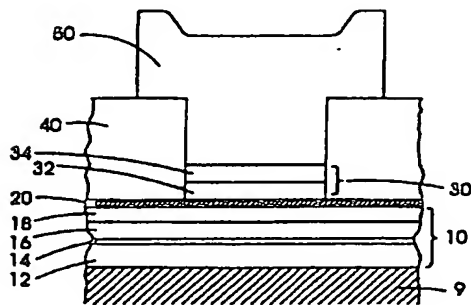
40、40' 絶縁層

50 上部配線層

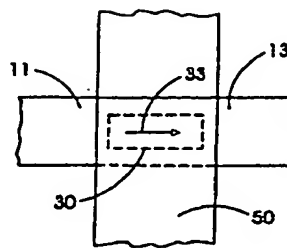
70 上部接合電極スタック

10 72 強磁性層

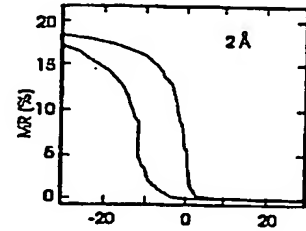
【図1】



【図2】

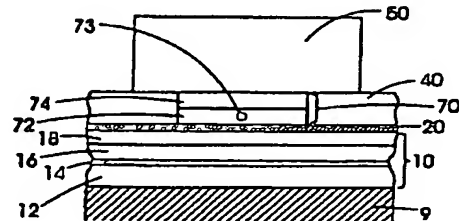
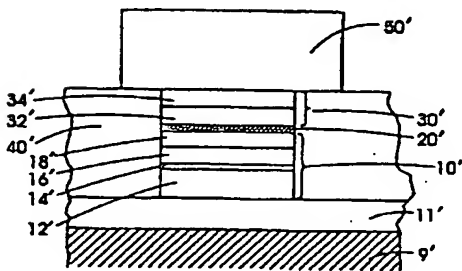


【図11】



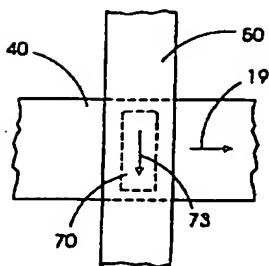
【図4】

【図3】

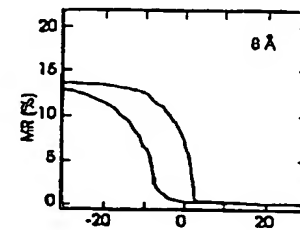
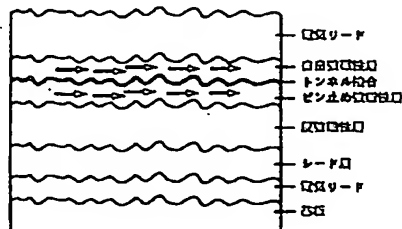


【図12】

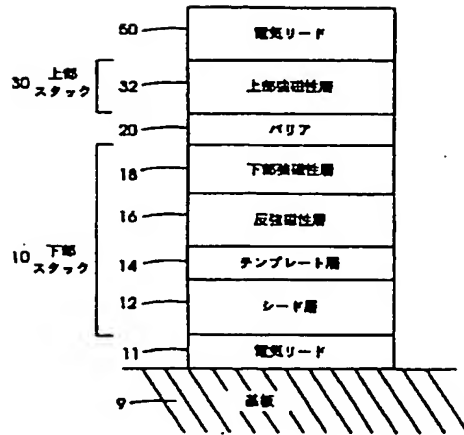
【図5】



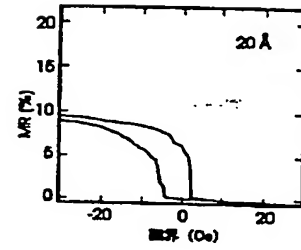
【図9】



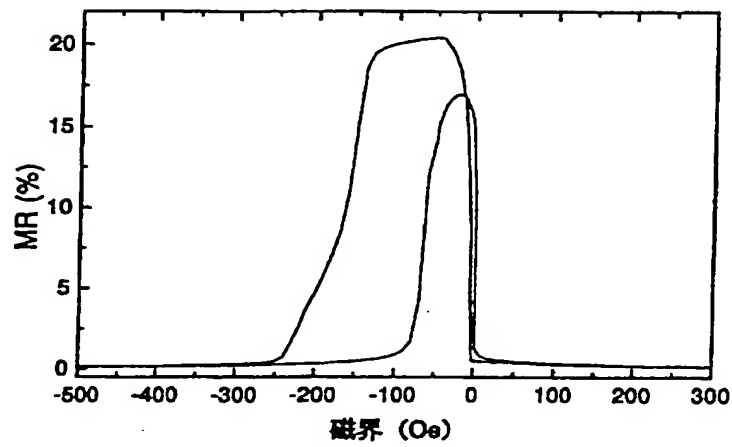
【図6】



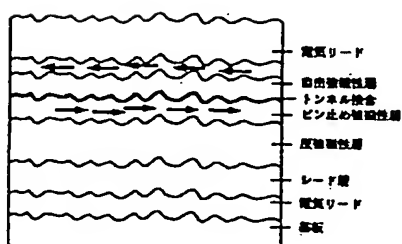
【図13】



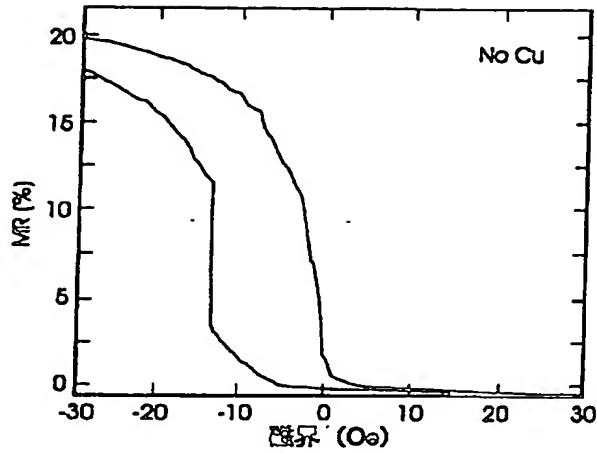
【図7】



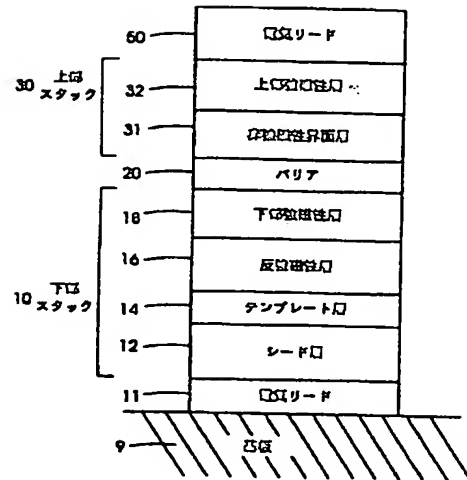
【図15】



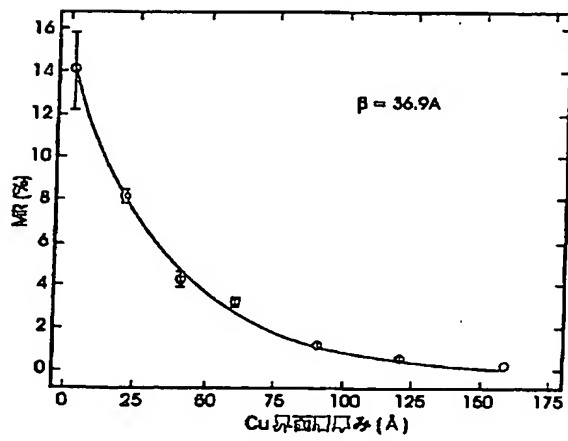
【図8】



【図10】



【図14】



【図16】

